

Schwache Basis

Ergebnisse aus Zugscherversuch wenig aussagefähig beim Dimensionieren von Klebverbindungen

Der Zugscherversuch ist die am häufigsten angewandte Prüftechnik für Klebverbindungen. Die dabei ermittelte Klebfestigkeit ist jedoch eine wenig aussagefähige Größe. In keinem Fall kann sie als Werkstoffkennwert den Klebstoff charakterisieren. Als Ausgangsgröße für Berechnungen bei der Dimensionierung von Klebverbindungen ist das Ergebnis des Zugscherversuchs deshalb nicht geeignet.

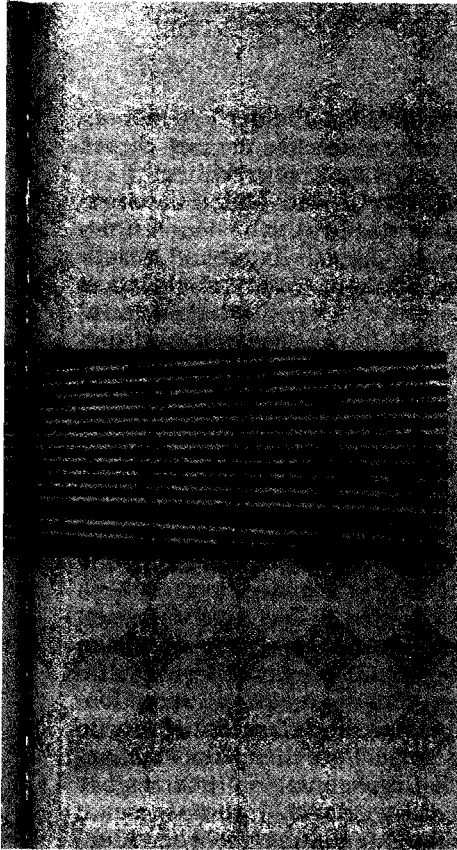
Manfred Rasche

MM
Maschinenmarkt

Der Zugscherversuch ist derzeit die am häufigsten angewandte Prüftechnik für Klebverbindungen. Auf Ergebnissen, die mit dem Zugscherversuch ermittelt worden sind, beruht der weit überwiegende Teil der veröffentlichten klebtechnischen Untersuchungen. Die im Zugscherversuch ermittelte Klebfestigkeit wird auch häufig zur Charakterisierung von Klebstoffen herangezogen. Da somit der Zugscherversuch in der Klebtechnik eine dominierende Rolle spielt, soll er hier einer kritischen Betrachtung bezüglich seiner Aussagekraft unterzogen werden.

In Bild 1 sind die Probenmaße und die Probenanordnung für den Zugscherversuch nach DIN 53283 dargestellt. Es zeigt gleichzeitig die Verformung der Probe bei Belastung. Die Probenabmaße sind in

Dr.-Ing. Manfred Rasche ist Inhaber eines Ingenieurbüros für Klebtechnik, Oberflächentechnik und Niederdruckplasmatechnologie in Berlin.



DIN 53281 genormt. Als Probenwerkstoff legt die gleiche Norm Al-CuMg2pl fest, läßt jedoch auch andere Werkstoffe zu.

Zum Versuch wird die geklebte Probe mit Beilagen in eine Zugprüfmaschine eingespannt. Die Beilagen gleichen den Versatz der Fügeteile aus und verhindern somit eine zusätzliche Belastung durch das Verspannen der Probe.

Die Probe wird dann zügig mit gleichmäßiger Geschwindigkeit bis zum Bruch belastet. Die maximal gemessene Kraft, die Bruchkraft, wird durch die geklebte Fläche dividiert. Der so ermittelte Wert ist die Zug-scherfestigkeit oder Klebfestigkeit.

Das Ergebnis des Zugscherversuches wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Im folgenden wird der Einfluß einiger wichtiger Parameter kurz beschrieben. Aus Platzgründen muß auf die Wiedergabe von Diagrammen verzichtet werden. Entsprechende Abbildungen finden sich in [1] und [2]. Neben den aufgeführten Faktoren wirken sich noch der Probenwerkstoff, der Oberflächenzustand der Proben, die Prüftemperatur, die Prüfgeschwindigkeit und die Klebstoffverarbeitung, zum Beispiel die Aushärtung des Klebstoffes, auf das Prüfergebnis aus.

Festzustellen ist somit: Die Klebfestigkeit nimmt mit zunehmender Überlappungslänge hyperbelförmig ab. Die Form der Hyperbel ist, je

nach verwendetem Klebstoff, unterschiedlich [1].

Mit zunehmender Dicke der Fügeteile steigt die Klebfestigkeit weitgehend linear an. Der Anstieg ist auch hier klebstoffabhängig [1].

Mit steigender Festigkeit des verwendeten Fügeteiles nimmt die Klebfestigkeit in Form einer liegenden Parabel zu [3].

Dickere Klebschichten führen zu geringeren Klebfestigkeiten. Auch hier ist ein Klebstoffeinfluß feststellbar [1]. Aber auch bei sehr dünnen Klebschichten, kleiner als 0,05 mm, werden verminderte Klebfestigkeiten beobachtet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die im Zugscherversuch ermittelte Klebfestigkeit kein Werkstoffkennwert des Klebstoffes ist, sondern daß es sich um eine Verbindungsfestigkeit handelt. Der Einfluß von Geometrie- und Werkstoffaktoren der Fügeteile wurde deutlich.

Bei der Darstellung der Prüfergebnisse von Klebverbindungen ist im allgemeinen lediglich die Klebfestigkeit angegeben. Auf das Bruchverhalten der Proben wird hingegen meistens nicht eingegangen. Dies ist aber unbedingt notwendig, um die Prüfergebnisse richtig interpretieren zu können. An einem Beispiel soll das gezeigt werden.

Bruchkraft der Verbindung steigt mit Überlappung

In Bild 2 ist schematisch der Einfluß der Überlappungslänge auf die Bruchkraft und die Klebfestigkeit einer Klebverbindung dargestellt. Bei guter Adhäsion zwischen Klebstoff und Fügeteil steigt die Bruchkraft der Verbindung mit steigender Überlappungslänge an. Die Klebfestigkeit vermindert sich dabei. Ursache dafür ist der ungleichmäßige Spannungszustand in der Probe.

Bei einer bestimmten Überlappungslänge wird die Tragfähigkeit des Fügeteils erreicht, die Verbindung versagt jetzt durch einen Bruch im Fügeteil. Eine vergrößerte Überlappung kann die Bruchkraft nicht erhöhen. Weil die gleiche Bruchkraft jedoch auf eine vergrößerte Klebfläche bezogen wird, kommt rechnerisch eine verminderte Klebfestigkeit zustande. Ähnliches gilt auch, wenn die Verbindung kohäsiv im Klebstoff versagt.

Wird zusätzlich zur errechneten Klebfestigkeit das veränderte Bruchverhalten, im Beispiel das Eintreten von Fügeteilbrüchen, angegeben, so

können Fehlinterpretationen vermieden werden.

In Bild 3 ist für einen Klebstoff der Vergleich zwischen der Klebfestigkeit einer Metall-Metall-, einer Metall-Kunststoff- und einer Kunststoff-Kunststoff-Klebverbindung dargestellt. Als Fügeteilwerkstoffe wurden Aluminium (Al) und Polyoximethylen (POM) verwendet. Die Probenabmessungen sind, bis auf die unterschiedliche Dicke der Metall- und Kunststoffteile, gleich.

Qualität des Klebstoffs nicht charakterisiert

Bild 3 zeigt, daß mit der Metall-Klebverbindung die höchste Klebfestigkeit erreicht wird. Die Werte der Kunststoff-Klebverbindung sind die geringsten. Die Festigkeit der Kunststoff-Metall-Klebverbindung liegt dazwischen. Diese Ergebnisse haben zwei Ursachen: Infolge der ungleichen Probendicke verändert sich die Biegebelastung in den Fügeteilen, und das Festigkeitsverhalten von Kunststoff und Metall ist unterschiedlich.

Der Vergleich zeigt, daß von der unter Normbedingungen ermittelten Klebfestigkeit nicht auf die Festigkeit anders gearteter Klebverbindungen geschlossen werden kann. Auch hier wird wieder deutlich, daß die Zug-scherfestigkeit eine Verbindungs-festigkeit ist und nicht den Klebstoff charakterisiert.

Die Spannungsverteilung in der Klebschicht einer Zugscherprobe ist sehr ungleichmäßig. Bei Belastung stellt sich ein ungleichmäßiger, aus Normal- und Schubspannungen zusammengesetzter Spannungszustand ein, der an den Überlappungsenden sein Maximum erreicht [4]. Im Zugscherversuch versagt die Verbindung, wenn an den Enden der Überlappung partiell die Tragfähigkeit überschritten wird. Der Normspannungsteil ist höher als der Schubspannungsteil. Die Spannungsspitzen sind gegenüber der rechnerisch ermittelten mittleren Spannung außerdem um ein Mehrfaches erhöht [4].

Der Normspannungsanteil führt zu einer Schälbelastung am Überlappungsende. Verformbare Klebstoffe können aufgrund ihres Verhaltens die Schälspannungen auf einen größeren Bereich verteilen, wodurch höhere Klebfestigkeiten als bei spröderen Klebstoffen erreicht werden.

Eine ungleichmäßige Spannungsverteilung gibt es jedoch nicht nur in der Klebschicht, sondern auch in

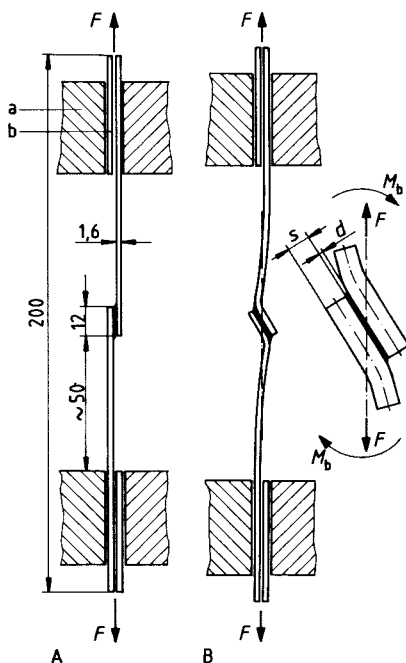


Bild 1: Probenanordnung für den Zugscherversuch (A) und Verformung der Probe bei Belastung (B), Probenbreite 25 mm
a Spannbacke, b Beilage

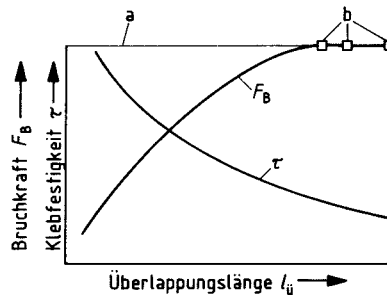


Bild 2: Zusammenhang von Bruchkraft, Klebfestigkeit und Überlappungslänge
a Fügeteilfestigkeit, b Fügeteilbruch

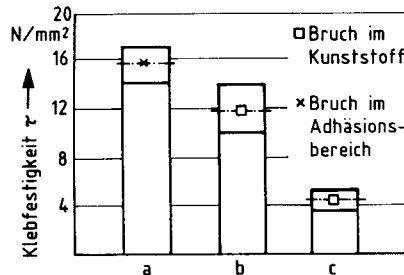


Bild 3: Festigkeit unterschiedlicher Klebverbindungen bei gleichem Klebstoff (Probenbreite 25 mm, Überlappungslänge 12 mm, Probendicke bei Aluminium (Al) 1,5 mm, Probendicke bei Polyoximethylen (POM) 4 mm)
a Al/Al, b Al/POM, c POM/POM

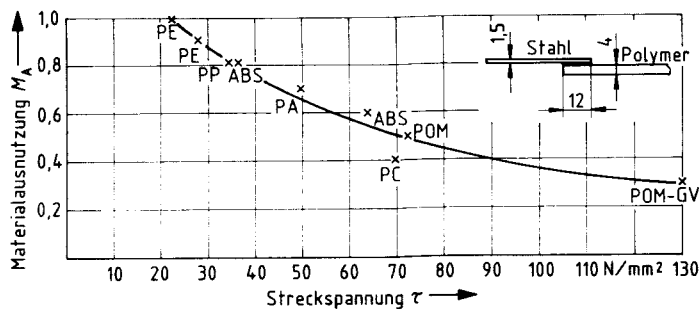


Bild 4: Materialausnutzungsfaktor für Kunststoff-Metall-Klebverbindungen ($M_A = \sigma_{\text{Bruch}} / \sigma_{\text{Klebstoff}}$)

Klebverbindung und der Bruchspannung oder Streckspannung dieses Werkstoffes im Zugversuch an.

Bild 4 zeigt den Materialausnutzungsfaktor für verschiedene Kunststoffe in einer Kunststoff-Metall-Klebverbindung. Während ein stark verformbares Polyethylen (PE) geringer Festigkeit voll ausgenutzt werden kann, kann das hochfeste glasfaserverstärkte Polyoximethylen (POM) nur noch ein Drittel der im Zugversuch übertragbaren Kraft übertragen. Ursache dafür ist die mit steigender Festigkeit zunehmende Kerbempfindlichkeit der Polymere.

Die gezeigte Materialausnutzung gilt in dieser Form nur für diese Probengeometrie, den verwendeten Klebstoff und die angewendeten Prüfbedingungen. Veränderte Bedingungen führen zu einer anderen Materialausnutzung. Tendenziell dürfte das gezeigte Verhalten jedoch auf andere Gegebenheiten übertragbar sein. Es wird dabei vorausgesetzt, daß eine gute Haftung zwischen Klebstoff und Metall- oder Kunststofffügeteil besteht, so daß die Proben im Kunststoffteil versagen.

Keine geeigneten Daten für das Dimensionieren

Das Biegemoment führt am Ende der Überlappung zu einer Verformung der Fügeteile (Bild 1). Schon bei Klebfestigkeiten unter 10 N/mm² kommt es bei metallischen Fügeteilen zu einer bleibenden Verformung. Zusätzlich zur am Überlappungsende vorhandenen Spitzenbelastung tritt somit eine hohe Dehnung auf. Diese führt zu einer zusätzlichen Belastung. Der Klebstoff muß am Überlappungsende nicht nur hohe Belastungen ertragen, sondern gleichzeitig noch sehr dehnbar sein.

Eine Belastung, die dieser Prüfbelastung entspricht, kommt in der Praxis bei geklebten Teilen nicht vor. Derart hohe plastische Dehnungen würden Bauteile wegen zu großer Verformung unbrauchbar machen. Die Prüftechnologie entspricht somit nicht den Gegebenheiten der Praxis.

Althoff hat in zahlreichen Versuchen nachgewiesen, daß ein Klebstoff auch in einer Metallklebverbindung das werkstoffmechanische Verhalten eines Kunststoffes beibehält. Die Versuchsergebnisse sind in [6] zusammenfassend dargestellt. Diese Erkenntnis hat weitreichende Folgen für die Berechnung von Klebverbindungen.

Kunststoffe zeigen ein anderes werkstoffmechanisches Verhalten

den Fügeteilen. Es bilden sich jeweils am Ende der Überlappung Spannungsspitzen, die die mittlere Spannung in den Fügeteilen um ein Mehrfaches übersteigen [5]. Verformungsfähige Werkstoffe wie Stahl oder Aluminium können diese Spannungsspitzen ertragen. Durch Fließvorgänge und die Stützwirkung weniger belasteter Bereiche des Fügeteiles werden die Spannungen abgebaut, so daß das Teil sie ohne Bruch ertragen kann. Der Fügeteilbruch tritt außerhalb der Klebstelle ein.

Bei kerbempfindlichen Werkstoffen, wie es viele Kunststoffe sind, können die Spannungsspitzen jedoch nicht abgebaut werden. In diesem Falle kommt es zum Bruch der Verbindung im Kunststoffteil. Dieses Verhalten führt zu einer verminderten Tragfähigkeit des Teiles in der Klebverbindung.

Die verminderte Tragfähigkeit läßt sich durch den Materialausnutzungsfaktor ermitteln. Er gibt das Verhältnis zwischen der mittleren Bruchspannung des Fügeteiles einer



als Metalle, zum Beispiel Stahl. So neigen Kunststoffe stark zum Kriechen, ein Verhalten, das bei Stählen erst bei erhöhter Temperatur eintritt, normalerweise jedoch nicht beachtet werden muß. Damit lassen sich die vielfach auf das werkstoffmechanische Verhalten des Stahls aufbauenden Festigkeitsregeln bei Kunststoffen nicht anwenden. Die Dimensionierung von Kunststoffteilen muß mit Hilfe von Langzeitfestigkeitswerten (Zeitstandsfestigkeit, dynamische Festigkeit) erfolgen [7]. Weil der Klebstoff in Metallklebverbindungen sein Verhalten als Kunststoff beibehält, muß auch eine Metallklebverbindung nach den Regeln für das Konstruieren mit Kunststoffen dimensioniert werden.

Der Zugscherversuch geht von einer Kurzzeitbelastung der Fügeteile aus. Er erfüllt somit nicht die Bedingungen, die für das Konstruieren mit Kunststoffteilen gestellt werden. Somit sind die im Zugscherversuch ermittelten Kenndaten zur Dimensionierung von Klebverbindungen nicht geeignet. Die verschiedenen, auf den Zugscherversuch aufbauenden Berechnungsverfahren, bewähren sich alle nur für eine Kurzzeitbelastung.

Im folgenden soll das Festigkeitsverhalten von Klebverbindungen bei Langzeitbelastungen aufgezeigt werden.

Grundlage für Berechnung nicht mit Zugscherversuch

Bild 5 zeigt für zwei Klebstoffe das Zeitstandsverhalten. Es ergeben sich gegenüber dem Kurzzeitversuch zum Teil beträchtlich verminderte Tragfähigkeiten. Beim Zeitstandsversuch tritt ein anderes Versagenskriterium auf als beim Zugscherversuch. Versagensursache ist hier nicht das Überschreiten einer maximal ertragbaren Belastung an den Überlappungsbenden der Probe, sondern es führen Kriechvorgänge zum Versagen der Proben.

Interessant ist, daß der Klebstoff a trotz seiner bei Raumtemperatur höheren Anfangsfestigkeit eine wesentlich geringere Zeitstandsfestigkeit als der Klebstoff b aufweist. Für einen Klebstoff ist jedoch die Langzeitfestigkeit der bestimmende Wert und nicht die Anfangsfestigkeit.

An dieser Stelle muß noch darauf hingewiesen werden, daß die Klebschichtdicke auch die Zeitstandsfestigkeit beeinflußt. Ausgehend von ersten Untersuchungen [8] kann gesagt werden, daß die Verminderung der Zeitstandsfestigkeit durch dik-

kere und sehr dünne Klebschichten wesentlich stärker als beim Zugscherversuch ist.

Bei näherer Betrachtung erweist sich die Zugscherprüfung von Klebverbindungen als eine wenig aussagefähige Prüfung. Die Belastung entspricht nicht den in der Praxis vorkommenden Bedingungen. Als Ausgangswert für Berechnungen ist das Ergebnis des Versuches nicht geeignet, weil im Kurzzeitversuch ermittelte Werte bei Kunststoffen einer Berechnung nicht zugrundegelegt werden dürfen. Vielfach wird versucht, mit sogenannten Abminderungsfaktoren den Festigkeitsverlust bei einer Langzeitbelastung zu erfassen, um mit diesem Wert dann zu rechnen [2]. Dies ist jedoch problematisch. Bild 5 zeigt beispielhaft, wie unterschiedlich sich die Klebstoffe im Zeitstandsversuch verhalten, was zu unterschiedlichen Abminderungsfaktoren führt.

Der Zugscherversuch läßt nur eine vergleichende Beurteilung von unter gleichen Bedingungen hergestellten Proben zu. So lassen sich beispielsweise qualitative Einflüsse auf das Alterungsverhalten von Klebverbindungen erfassen. In diesem Bereich

dürfte der Zugscherversuch weiter mit Erfolg angewandt werden können.

Die große Bedeutung, die der Zugscherversuch derzeit hat, hat er wahrscheinlich nur deshalb erlangt, weil er relativ einfach durchzuführen ist.

Schrifttum:

- [1] Matting, A.: Metallkleben. Berlin: Springer-Verlag, 1969.
- [2] Habenicht, G.: Kleben. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [3] Krekeler, K., und E. Litz: Neue Untersuchungen an Leichtmetall-Klebverbindungen. Aluminium 29 (1953), S. 150 – 160.
- [4] Otto, G.: Untersuchungen der Spannungen, Verformungen und Beanspruchungsgrenzen von Kunststoffschicht und Fügeteil bei einschichtig überlappenden Metallklebverbindungen. Dissertation RWTH Aachen, 1978.
- [5] Hahn, O., und B. Wender: Beanspruchungsanalyse von geometrisch und werkstoffmechanisch „unsymmetrischen“ Metallklebverbindungen mit der Finite-Elemente-Methode. Schweißen und Schneiden 37 (1985) 2, S. 74 – 79.
- [6] Althof, W.: Verformungs- und Festigkeitsverhalten von Klebverbindungen bei Kurz- und Langzeit-Beanspruchung. Fachtagung Fertigungssystem Kleben, TUB-Dokumentation Kongresse und Tagungen, Heft 21.
- [7] Schreyer, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. München: Hanser-Verlag, 1972.
- [8] Wellinger, K., und U. Rembold: Verhalten von Metallklebverbindungen. VDI-Z. 100 (1958), S. 41 – 48.

